



Entre terre et eaux, les fonctions écologiques des zones humides

Geneviève BARNAUD

MNHN-Département Écologie et gestion de la biodiversité-SPN

- **Fonctions hydrologiques**
Régulation des eaux
- **Fonctions biogéochimiques**
Épuration de l'eau
- **Fonctions biodiversité**
Ressources de qualité

Séminaire technique
« Zones Humides des Têtes de Bassin Versant »
plate-forme « Eau, espaces, espèces »
10-11 juin 2009, Nedde - Limousin



Diversité des zones humides



Des espaces de transition,
des écosystèmes,
des paysages diversifiés
au sein du bassin versant

→ Une variété de localisation,
superficie, configuration,
fonctionnement, fonctionnalités

En majorité, les ZH européennes
→ modifiées, modelées, créées par l'homme

Mille et une source pour un estuaire!

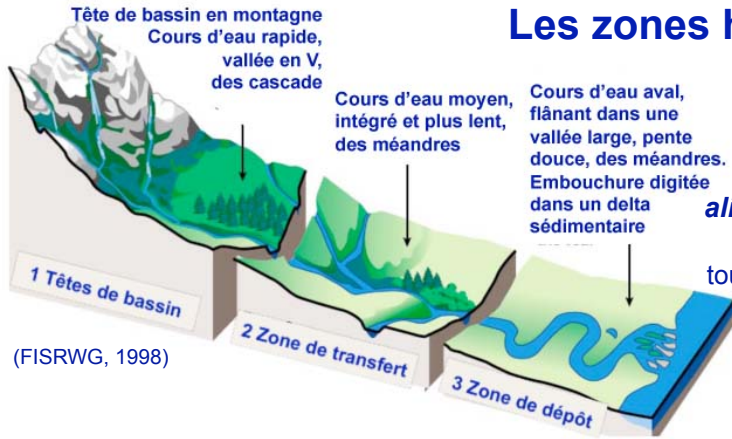


→ Des définitions juridiques, scientifiques,
des énoncés d'écologues, d'hydrologues,
pédologues, botanistes, ethnologues...



© Silk et Ciruna. 2004)

Les zones humides de tête de bassin



"Zones humides de tête de bassin ou de pente, alimentées par les eaux de ruissellement et les eaux de pluies"

tourbières hautes et basses, milieux fontinaux, prairies humides et/ou tourbeuses, pozzines corses, aulnaies, saulaies, phragmitaies, cariçaies...
(définition du SDAGE, bassin RMC, 2001)

→ Souvent négligées, oubliées dans les inventaires

- petites tailles
- dispersées

Et pourtant diversifiées, capitales pour le fonctionnement des hydrosystèmes



9 types de ZH (bassin de la Sèvre Nantaise, 2007) dont

1. ZH en têtes de bassin
2. Bordures boisées des cours d'eau et ruisseaux
3. Prairies inondables en bordures de cours d'eau

7 types de milieux aquatiques (bassin Adour-Garonne, 2008), dont

1. Cours d'eau de montagne
3. ZH de tête de bassin versant



En bref, l'une des caractéristiques majeures

→ L'eau (douce, salée) comme moteur du fonctionnement

- en quantité variable dans le temps (hydropériodicité)
- de manière rythmée (flood pulsing)

→ Préalable à :

- la constitution de sols hydromorphes
- l'installation d'une flore et faune adaptées
- à l'expression des fonctionnalités

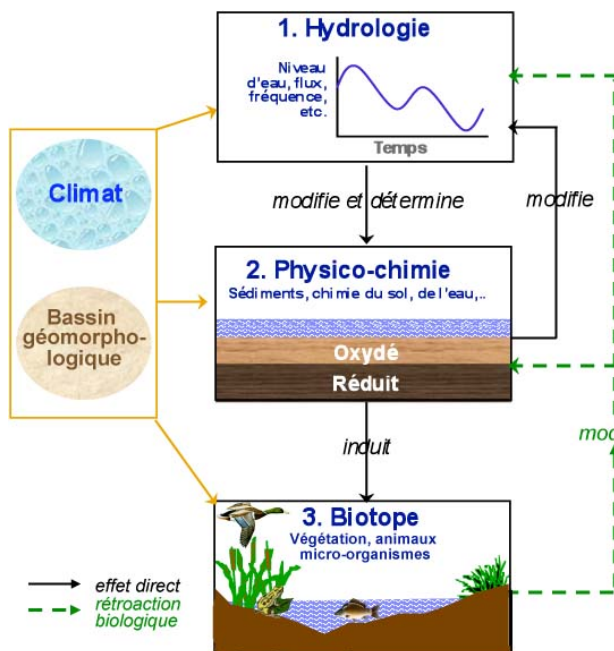


Schéma du fonctionnement d'une zone humide (d'après Mitsch & Gosselink, 2000)



Alimentation en eau : pluie, sources, fonte des neiges, eaux de ruissellement, affleurements de nappes de surface, connexions avec d'autres marais

* **Hydropériode** : patron saisonnier des niveaux d'eau résultant de la combinaison du budget en eau et de la capacité de stockage d'une ZH

Des dynamiques spatio-temporelles sous influence

→ **Succession écologique à des pas de temps variables**
des processus non linéaire, avec des stades de blocage

→ **Tendances observées au cours de la succession :**

- évolution de la composition spécifique, la diversité, la biomasse, des réseaux trophiques

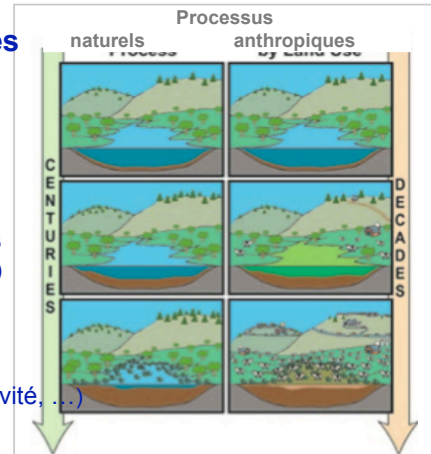
→ **Processus accéléré par certaines activités humaines**
(érosion, modification hydrologique...)

• **Une inscription dans un environnement interactif**

Intégration du fonctionnement des métapopulations, des flux (matrice, tache, corridor, zone source ou puits, fragmentation, connectivité, ...)

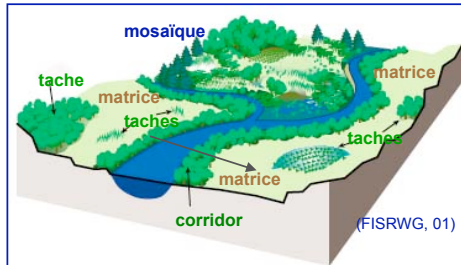
Au-delà de sites individuels des unités fonctionnelles

Cf. Trame verte et bleue

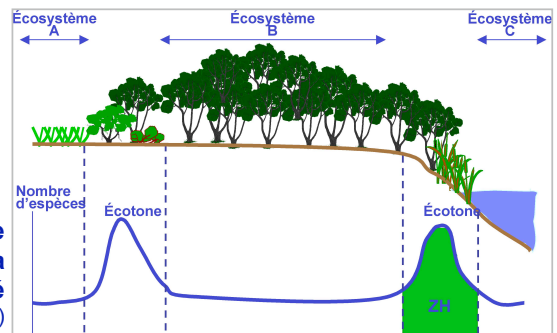


Durées de vie d'un lac dans un contexte naturel/anthropisé (Carpenter et al., 1998)

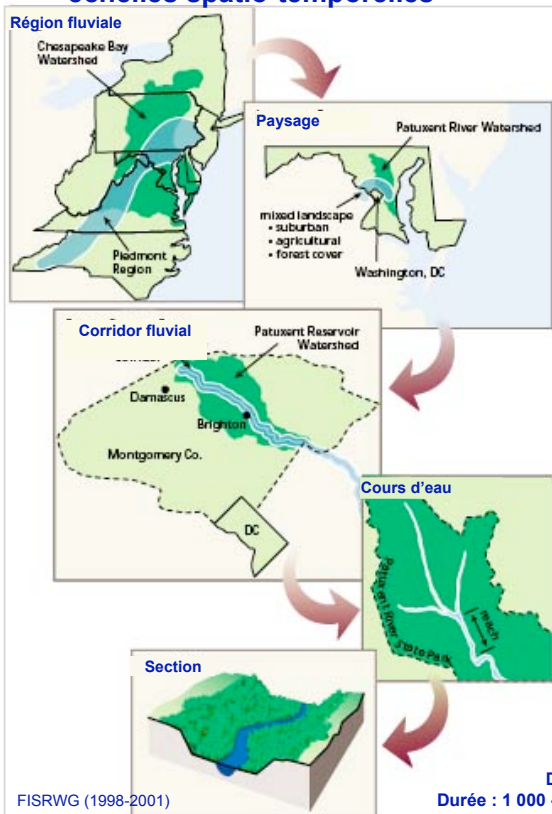
→ **Les zones humides, des écotones,**
ayant des propriétés (fonctions) écologiques



Schématisation de l'écotone et de sa biodiversité
(Amoros et al., 1993)



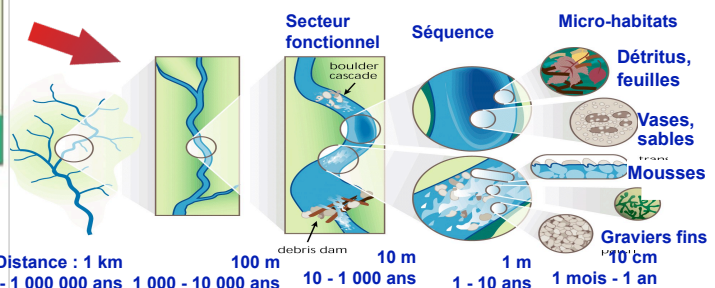
Conservation d'un hydrosystème Prise en compte des différentes échelles spatio-temporelles



Des systèmes hiérarchisés

Expression des processus
(hydrologiques, pédologiques, biologiques...)
sur des durées et étendues variables

Du jour aux siècles,
des particules au bassin versant



Le déclin

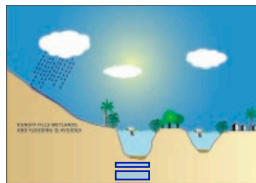
Constat des effets de la dégradation des ZH

Conséquences après destruction

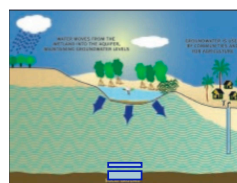
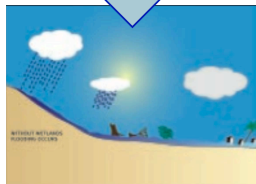
- Inondation
- Sécheresse
- Pollution de l'eau
- Érosion des côtes et berges
- Diminution des ressources
- Extinction d'espèces

Fonctions concernées

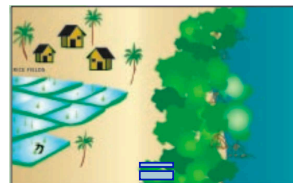
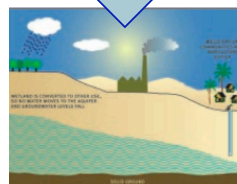
- Écrêtement des crues
- Stockage des eaux
- Recharge des nappes phréatiques
- Rétention et transformation des polluants
- Dépôt et stabilisation des sédiments
- Habitats de nombreuses espèces (alimentation, reproduction)



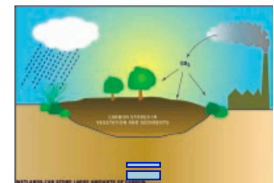
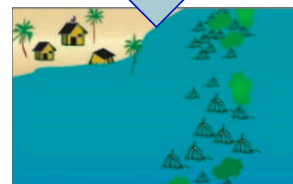
Inondation



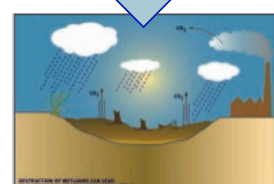
Abaissement de la nappe



Submersion côtière



Perturbation du cycle du C



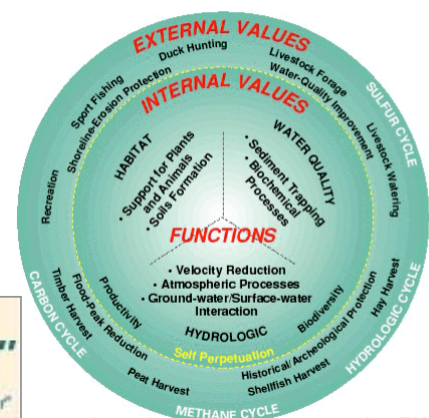
Rôles écologiques et socio-économiques des écosystèmes

→ Prise de conscience de l'importance des ZH pour le bien-être des sociétés

- Compréhension des **fonctions écologiques et valeurs**
- **Evaluation financière** des services rendus

→ Changement du discours

- Conservation des ZH au titre de la prévention des risques, de l'hygiène et de la production
- La notion d'**infrastructure naturelle**



Fonctions, valeurs internes et externes des ZH (Novitzki et al., 1997)

→ Le concept de service écosystémique

Adopté par la CDB (MAE), Ramsar

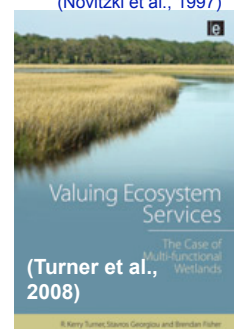
Fonction (écologique) : propriété d'un écosystème liée à son fonctionnement

Fonctionnalité : ensemble de fonctions propres à un écosystème

Valeur : qualité attribuée par des personnes à une caractéristique du système

Service : avantage retiré par la société d'une (des) fonction(s) et valeur(s)

Bien, intérêt : bénéfice financier provenant d'un (des) service(s) rendu(s)



Des approches ± distinctes

Années 50

Naturalistes

Prise en compte de l'intérêt patrimonial

- diversité en espèces, communautés
- abondance
- habitat d'espèces en danger
- paysage, etc.

Les rôles



(Duke, 1995)

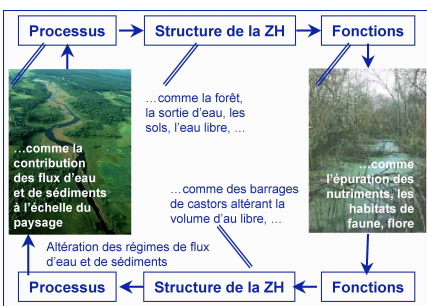
Années 60-70

Écologues

Étude du fonctionnement des écosystèmes. Mise en évidence de processus, de propriétés :

- productivité I, II, III
- relations trophiques
- les grands cycles biogéochimiques
- régime hydrologique, etc.

Les fonctions



Boucle des feedbacks due aux activités biologiques (Washington DSE, 2004)

Les ZH comme éléments d'un vaste système (Abbot et Hailu, 2001)

Economie
- Prix
- Accès marché

Démographie
- Croissance de la population

Origines des notions

Années 80

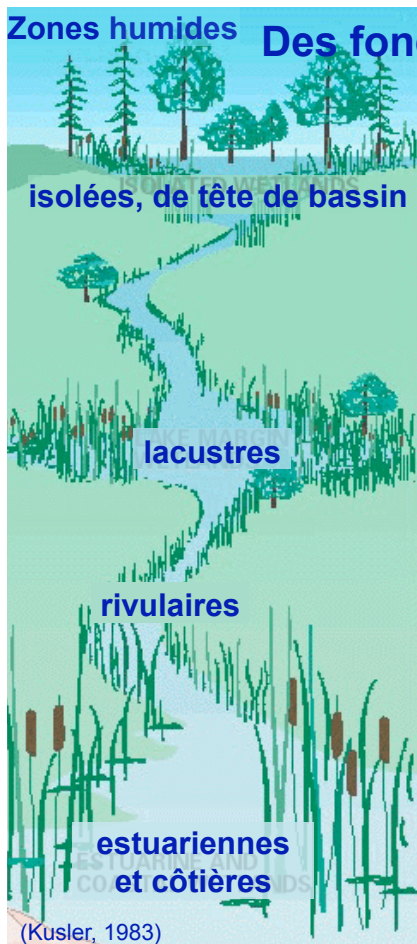
Sociologues

- identification des usages
- exploitation des ressources
- perception des valeurs

Économistes

- évaluation financière des produits obtenus
- quantification des bénéfices retirés

Les services rendus



(Kusler, 1983)

Des fonctions en partie distinctes d'amont en aval

Selon la localisation dans le bassin versant

Des fonctionnements donc des fonctionnalités différentes

→ Les zones humides

• Isolées, tête de bassin

- Reproduction, alimentation d'oiseaux d'eau
- Habitats d'espèces de zones humides et terrestres
- Stockage d'eau douce
- Rétention de sédiments et nutriments
- Paysage

• Lacustres

Idem « isolées »

- + Zone de frai d'espèces de poissons
- + Elimination sédiment et nutriments des eaux d'alimentation

• Rivulaires

Idem « isolées »

- + Contrôle des sédiments et stabilisation des berges
- + Régulation d'inondation

• Estuariennes et côtières

Idem « isolées »

- + Habitats et zones de frai des poissons, crustacés, coquillages
- + Source de nutriment pour les ressources halieutiques
- + Protection rivage/érosion et tempête

Fonctions hydrologiques

Fonctions - Services

Ralentissement et stockage des eaux à plus ou moins long terme

Contrôle des crues

Stockage et restitution des eaux étalée dans le temps

Recharge des nappes et soutien des étiages

Présence d'obstacles à l'écoulement

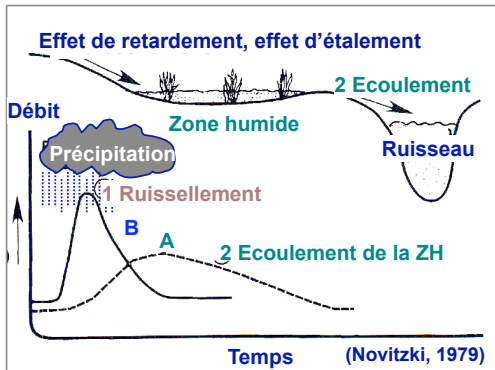
Réduction de l'énergie des eaux/érosion

→ Régulation du régime hydrologique

Déboisement, culture, urbanisation

L'explication

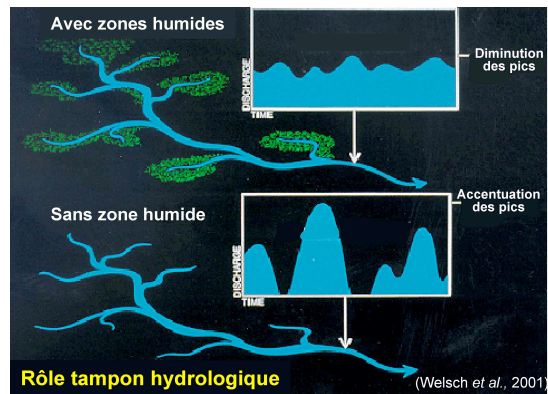
→ Inondation brusque et importante



Comparaison de 2 bassins versants, A et B
30% de la superficie du bassin A en ZH et lacs
Pics de crue du bassin B 60-80% supérieurs à celui du bassin A

→ Atténuation, décalage du pic de crue
déstockage progressif

Le constat



Rôle tampon hydrologique

(Welsch et al., 2001)

Rôle « d'éponge », de « réservoir »
Registre majeur des zones humides de tête de bassin

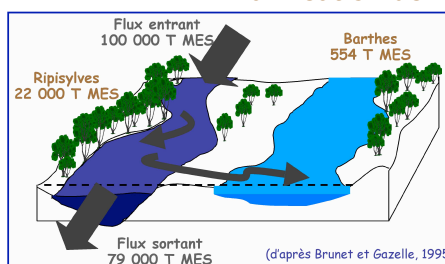
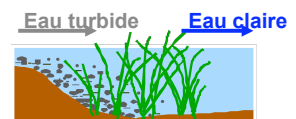
→ Les têtes de bassin
Un capital hydrologique

Fonction « rétention de matières en suspension »

Fonctions - Services

Rétention, piégeage des matières en suspension

Clarification de l'eau



Bilan sédimentaire d'une crue de l'Adour à l'échelle d'un tronçon de vallée inondé (06/92)

Rétention dans des milieux humides riverains de cours d'eau (Seine) des matières particulaires transportées par les eaux

Éléments	MES	N-NH4	P total	N org.	C-org.
Rétention	94 %	78 %	84 %	86 %	64 %

(tranchet de 100 m l x 80 m de profondeur /chenal)

Distance du chenal (m)	Surf. (m ²)	M.E.S (t)	P Total (kg)	N org. (kg)	C org. (kg)
0 - 10	1000	17	37,5	54	780
10 - 55	4500	45	122	166	2025
55 - 80	2500	6,5	20,5	53	300
Total	8000	68,5	180	255	3105

Ripisylve: piégeage de 60 à 95% de l'azote associé aux particules en suspension



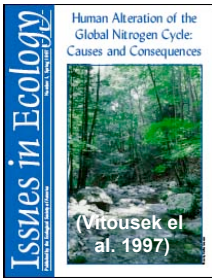
Rôle de « filtre » dans le répertoire des zones humides de tête de bassin

Dans des bassins versants couverts à 20-40 % par des ZH
Réduction de 80 à 94 % de la charge en MES
par les petits marais riverains de tête de bassin versant

(Peterjohn et Correll, 1984)

Aptitude contrôlée par de nombreux facteurs impliqués

- localisation, topographie, taille, nombre, état, nature et structure de la végétation
- type de précipitations, d'apport en eau souterraine
- capacité érosive du bassin versant...

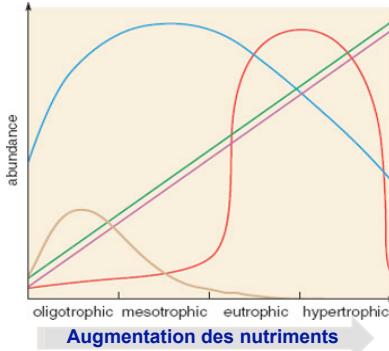
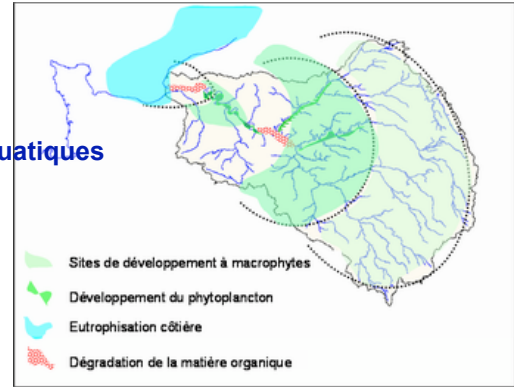


Un symptôme d'indigestion

Une menace insidieuse et paradoxale

L'azote, le phosphore, le carbone sources de vie et/ou de dégradation Dangereux en excès

→ Grande vulnérabilité des systèmes aquatiques aux apports massifs de nutriments

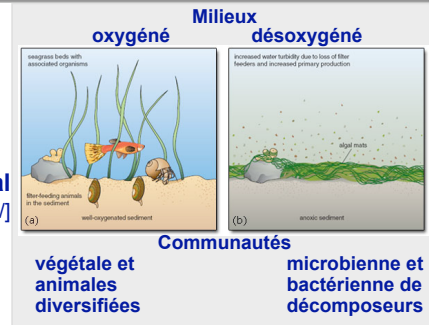


— Plantes aquatiques submergées
— Phytoplancton
— Concentration de phosphore
— Salmonidés
— Cyprinidés

Changement d'abondance d'espèces dus à l'eutrophisation (lacs tempérés) [openlearn.open.ac.uk/]

Augmentation des nutriments

Résultat de l'eutrophisation sur le littoral [openlearn.open.ac.uk/]



Des zones humides et têtes de bassin très efficaces pour améliorer la qualité de l'eau, en éliminant

- le phosphore et l'azote en moins de 20 m d'écoulement (tête de bassin du sud des Appalaches)
- 64% de l'azote inorganique en - de 300 m (modélisation 14 ruisseaux de tête de bassin aux Etats-Unis)
- 90% du phosphore dans 8 bassins de cours d'eau de 1^{er} ordre comprenant de ZH associées (N-E Etats-Unis) (American River & Sierra Club, 2007)

Fonctions biogéochimiques

Fonctions - Services

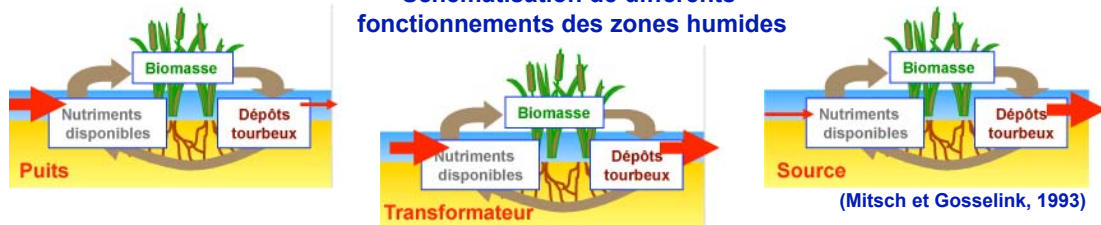
Piégeage-rétention, transformation-dégradation, production- exportation de l'azote, du phosphore, des métaux lourds, des micro-polluants organiques

Épuration, décontamination de l'eau

→ Epuration, caractéristique connue de manière empirique et utilisée mondialement :

- lagunages (plus ou moins sophistiqués)
- dispositifs de traitement d'effluents diffus

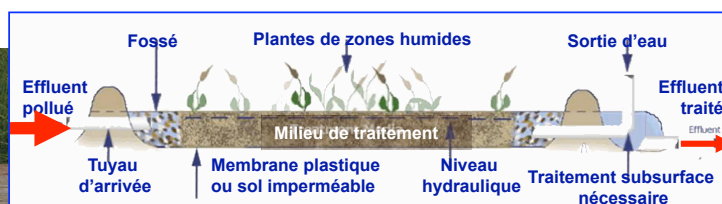
mais à nuancer



(Mitsch et Gosselink, 1993)

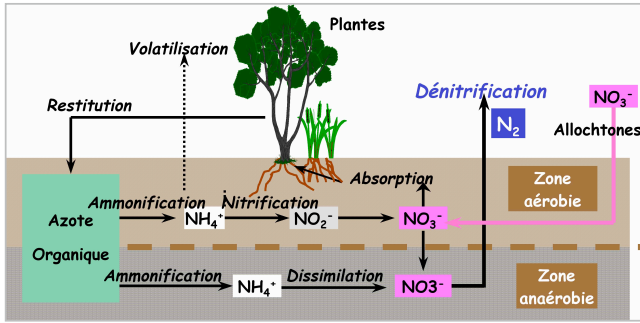


Rôle de « rein »
Une mission cruciale des zones humides



ZH traitement, Alhagen, Suède (Nilsson)

La dénitrification



Transformation de l'azote par absorption, ammonification, nitrification, dénitrification

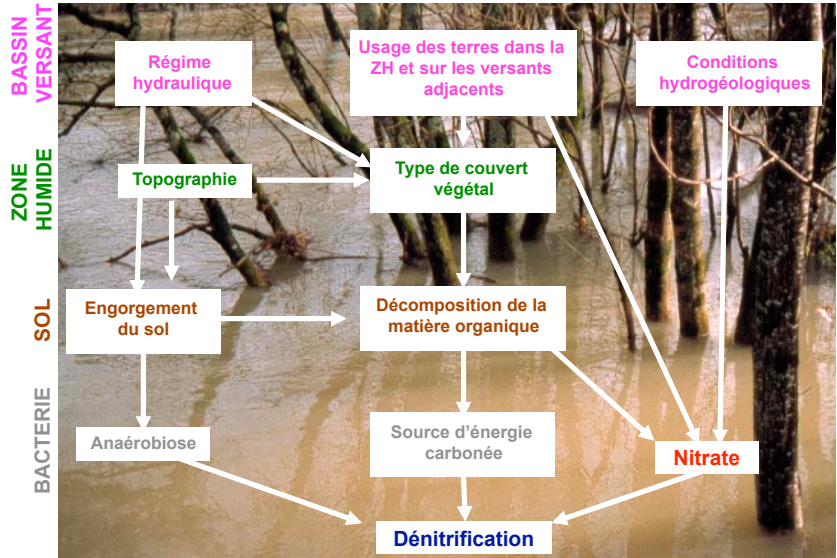
→ 2 processus biologiques en jeu :

- assimilation végétale (stockage)
- dénitrification microbologique (élimination N₂)

→ Une dénitrification sous influence
Hiérarchisation des facteurs régulant l'activité dénitrifiante dans les zones humides selon l'échelle de perception (Pinay et Trémolières, 2000)

Facteurs de régulation

- saison, végétation,
- contexte géomorphologique
- pratiques agricoles



La dénitrification, des résultats probants

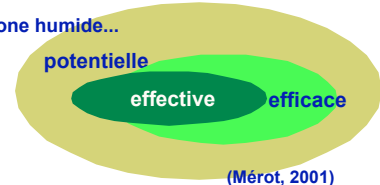
→ Un cas d'école, les zones humides de bas-fond de l'Ouest (Tyfon)
Projet PNRZH piloté par P. Mérot, financement européens, régionaux

Démonstration de la capacité de régulation des pollutions azotées sur une courte distance

→ Une typologie fonctionnelle innovante des ZH de bas-fonds
Un schéma général, des situations variées

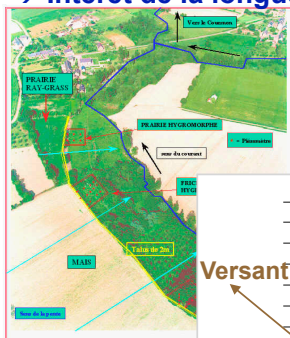
Modèles conceptuels de fonctionnement

Typologie fonctionnelle



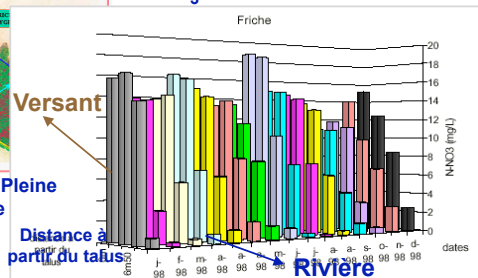
(Mérot, 2001)

→ Intérêt de la longueur de connexion / surface totale de ZH



Zones de bas-fond Pleine Fougères, Bretagne (Mérot et al., 2000)

Décroissance des concentrations en NO₃ à l'interface versant-ZH



7,60 mg/l N-NO₃ → 0,37 mg/l N-NO₃ au bout de quelques mètres de transit (Clément J.C., 2000).

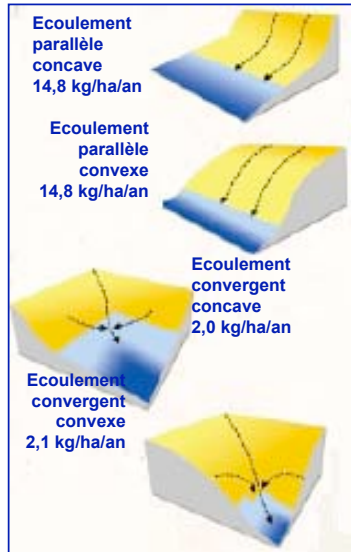
Les différents niveaux de la typologie

Zone Humide	Basé sur	Méthode
Potentielle	Indices topographiques Carte des sols hydromorphes	Modèle intégrant la surface drainée et la pente topo. (MNT) Cartographie sols
Effective	Usage du sol (drainage...) Indice d'humidité Végétation	Différents réseaux d'investigation possibles
Efficace	Flux de polluants entrant Géométrie interne	Analyse par BV Etude de terrain Modélisation

Epuration, des résultats contrastés

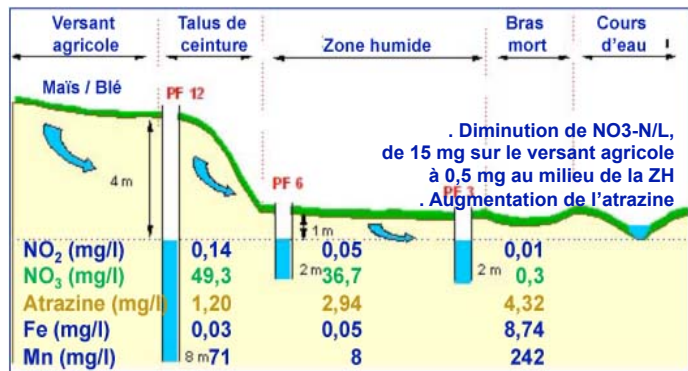
→ Dénitrification influencée par une série de facteurs agissant à différentes échelles

(saison, végétation, contexte géomorphologique, pratiques agricoles)



→ Selon le contexte géomorphologique

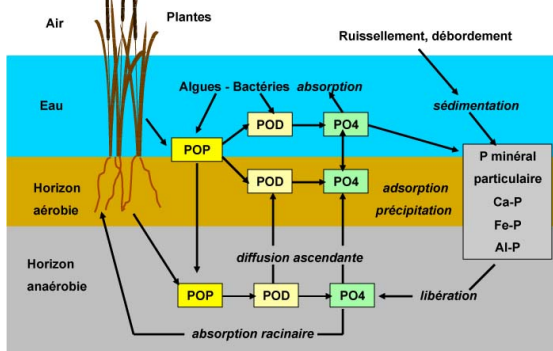
Dénitrification moyenne annuelle simulée, rapportée à la surface totale du bassin versant (zones bleues foncées = dénitrification maximale)



→ Selon les substances
Fort gradient de qualité de l'eau de sub-surface sur 15 m et toute l'année

Le devenir du phosphore

→ Plusieurs mécanismes et processus impliqués



Cycle du phosphore dans une zone humide

POP = phosphore organique particulaire

POD = phosphore organique dissous

PO₄ = ions phosphates. (d'après Mitsch & Gosselink, 1993)

→ Élimination du phosphore et de l'azote (kg/ha/an) dans des ZH boisées de plaine d'inondation du Sud-Est des Etats-Unis (DeBusk, 2001)

Mécanisme	Phosphore	Azote
Sédimentation	36	11
Adsorption/précipitation	200	64
Consommation microbienne	40	87
Prélèvement des plantes	4	52
Dénitrification		130

→ Des plantes gourmandes, consommation en phosphore et azote (kg/ha/an)



	Phosphore	Azote	Référence
Petite lentille d'eau (<i>Lemna minor</i>)	116 - 400	350 - 1 700	(DeBusk et Reddy, 1987)
Ecuille d'eau (<i>Hydrocotyle vulgaris</i>)	116 - 770	350 - 32 000	(DeBusk et Reddy, 1987)
Phragmites (<i>Phragmites australis</i>)	101	1 910	(Obarska-Pempkowiak, 1997)
Moyenne « prudente » Base données ZH US	80,3	547,5	(Knight et al. 1994)



Efficacité variable de l'élimination du phosphore et de l'azote

→ Selon les plantes considérées

Mode de fixation de l'azote et du phosphore par 2 hydrophytes (kg/ha/an)

	Partie épigée		Partie hypogée	
	N	P	N	P
<i>Phragmites australis</i>	270	35	260	50
<i>Scirpus lacustris</i>	160	20	320	55

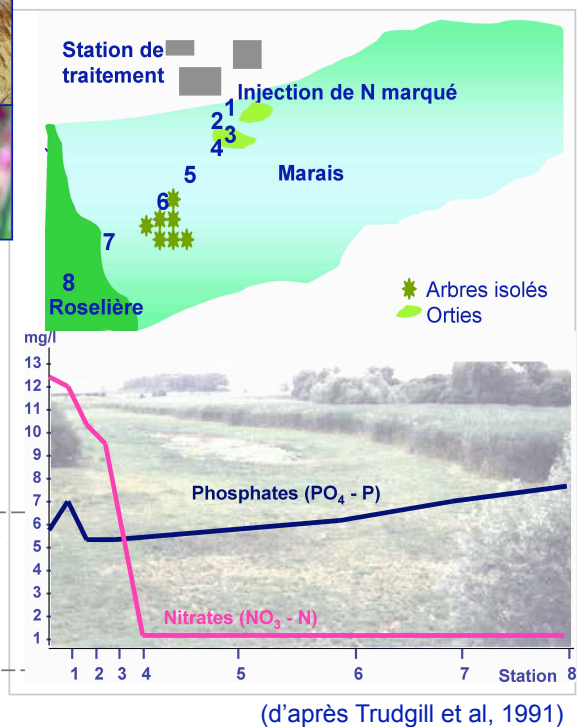
(de Jong, 1976)



Suivi expérimental de l'évolution des nitrates et phosphates au travers d'une zone humide

→ Facteurs de régulation de l'élimination du phosphore

- le contexte hydrogéologique
- le climat, la saison
- le temps de séjour de l'eau (ZH « fermées » ou « ouvertes »)
- la composition, la structure des communautés végétales

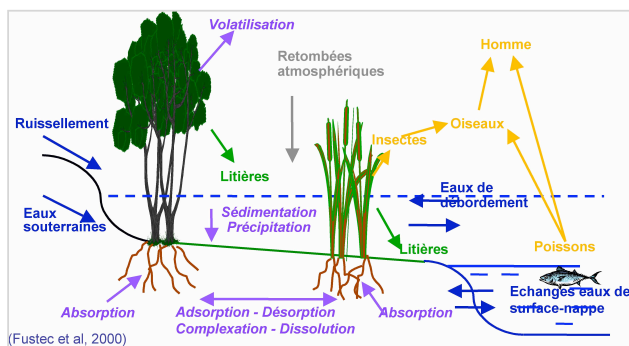


→ Métaux lourds

Les métaux lourds et micro-polluants

Principaux mécanismes : sédimentation, absorption, concentration par des plantes

Mais relargage à partir des sédiments, de la décomposition



Eaux retenues dans une mare, puis évacuées vers un ruisseau



Apports, rétention et circulation de métaux potentiellement toxiques dans une ZH ouverte

Suivi des concentrations dans les sédiments de 5 ZH

(stockage d'eaux pluviales)

Diminution : Zn, (57%), Pb (71%), Cu (48%)

Augmentation : As (150%)

En cause : comportement des métaux et rôle de la MO (Walker et Hurl, 2002)

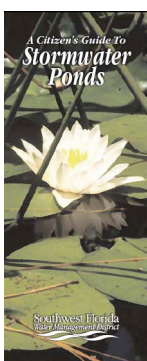
→ Micro-polluants organiques (fongicides, herbicides, insecticides)

Principaux mécanismes : piégeage, dégradation, relargage

Avec des impacts sur la flore et la faune (contamination)

Facteurs intervenants :

- type de substance, conditions physico-chimiques
- composition, structure de la végétation, des sédiments



Fonctions « biodiversité »

Fonctions - Services

Réseaux trophiques complexes - Écosystèmes dynamiques

Habitats pour de nombreuses espèces

Diversité des communautés

Forte productivité

Ressources végétales et animales exploitées



Nicolle

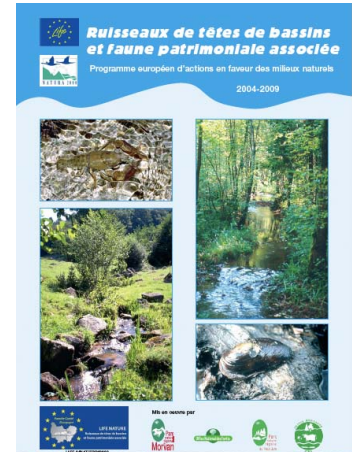
→ Une diversité biologique mal connue, une exploration constante
Systèmes d'eau douce, moins étudiées que les terrestres, mais une richesse spécifique plus élevée/superficie (Revenga et al., 2000)

Les zones humides d'eau douce contiennent plus de 40% des espèces de la planète et 12% de toutes les espèces animales (Ramsar, 2001)



(Ramsar, 2002)

Rôle de « réservoir d'espèces »



Justification de cette diversité biologique

→ Des milieux stressants :

- des gradients (hydriques, chimiques...)
- une hétérogénéité spatiale

→ Des répartitions le long des gradients d'humidité, de salinité...

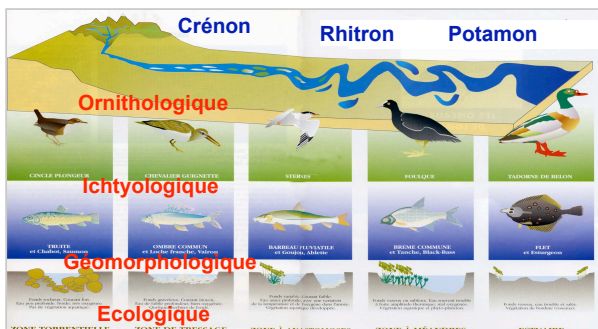
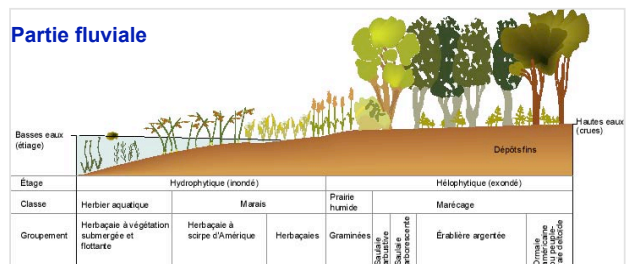
→ Conditions propices à une certaine biodiversité

Sur des berges fluviales

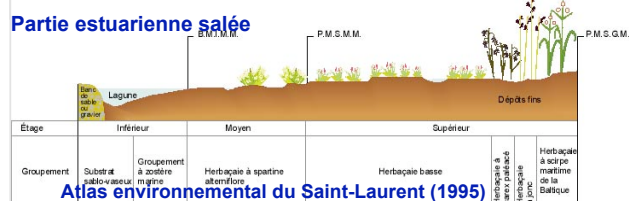
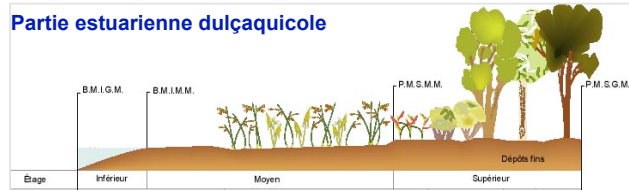
→ Les réponses des espèces :

→ Des adaptations (morphologiques, physiologiques...)

→ Zonation écologique amont-aval dans un bassin versant



(Ex. schématique de la Loire)



Atlas environnemental du Saint-Laurent (1995)

Des principes directeurs

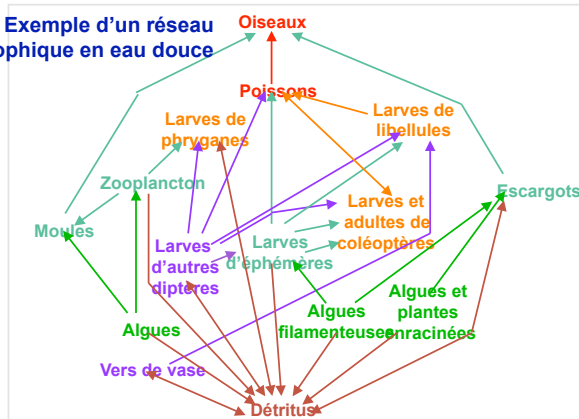
Une organisation longitudinale influençant les zones humides alluviales

→ Concept de « river continuum »

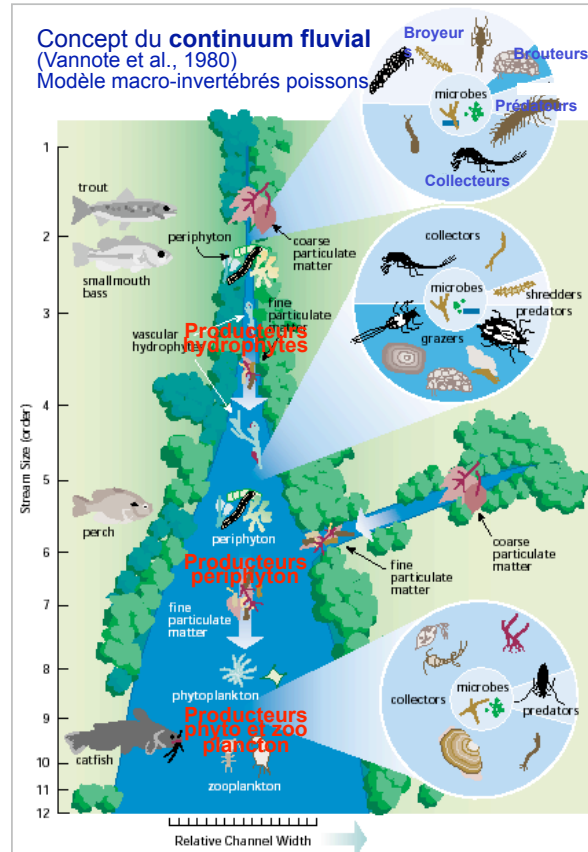
- Processus physiques (géologie, climat)
- Processus biologiques rivulaires (végétation)
- Processus physiques et biologiques dans la rivière (température, nutriments)

En milieu aquatique, des réseaux écologiques denses des pyramides écologiques à plusieurs niveaux

Exemple d'un réseau trophique en eau douce



Concept du **continuum fluvial** (Vannote et al., 1980)
Modèle macro-invertébrés poissons



La richesse des ZH, un paradigme à nuancer



→ Problème de définition, espèces de ZH ?
Résidentes, visiteurs réguliers, occasionnels ?

→ Inventaires incomplets selon les groupes, les régions

- quasi exhaustifs pour des espèces (vertébrés) et sites protégés
- des monographies par groupe, des recensements par région

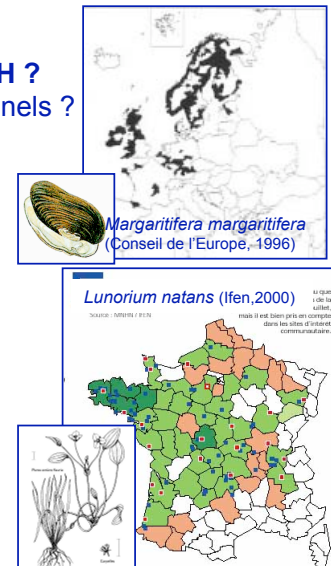
Des estimations « à la louche »

Richesse biologique des ZH métropolitaines

Un slogan : « Plus de 50% des espèces d'oiseaux ainsi que 30% des espèces végétales remarquables et menacées en France dépendent des principales zones humides françaises métropolitaines » (MATE, 1996)



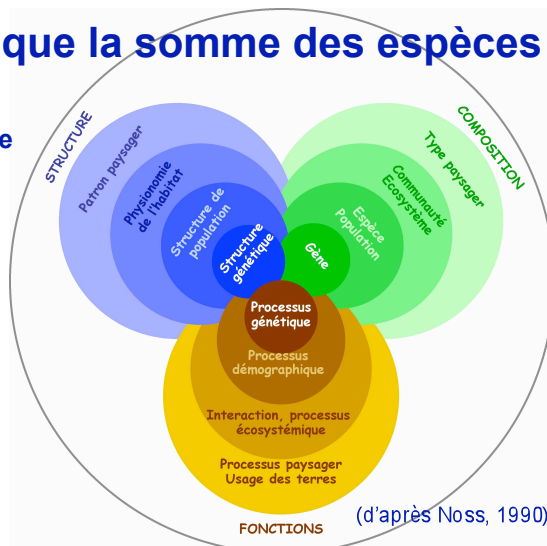
• Une liste de 775 espèces et 26 sous-espèces végétales pour la délimitation des zones humides pour la mise en œuvre des articles L. 214-7-1 et R. 211-108 du code de l'environnement (Nomenclature Eau) (Arrêté du 24/06/08)



La biodiversité, plus que la somme des espèces

- **Combinaison des 4 principaux niveaux selon 3 grands types d'approche**
- | | |
|------------|-------------|
| individu | composition |
| population | structure |
| écosystème | fonction |
| paysage | |

Participation différenciée des organismes
 Fonctionnement des écosystèmes influencé par
 - l'identité des espèces,
 - la composition et la diversité des communautés



Les moules perlières, un cycle de vie complexe (Kinet & Libois 1999)



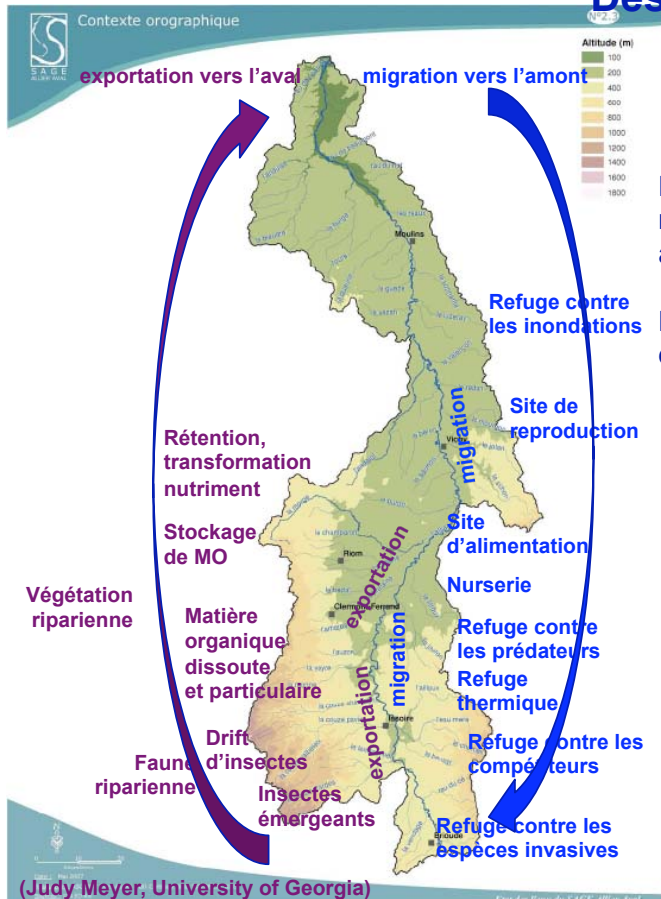
Spécificités du fonctionnement des milieux d'eau douce (Brönmark & Hansson, 2002)

- Perte de diversité → effets négatifs sur : la productivité I, II, III, la décomposition, le transport de nutriments, les structures trophiques
- Question de la stabilité, de la résilience, ...

→ **Donc, nécessité de maintenir au moins 1 espèce par groupe fonctionnel**

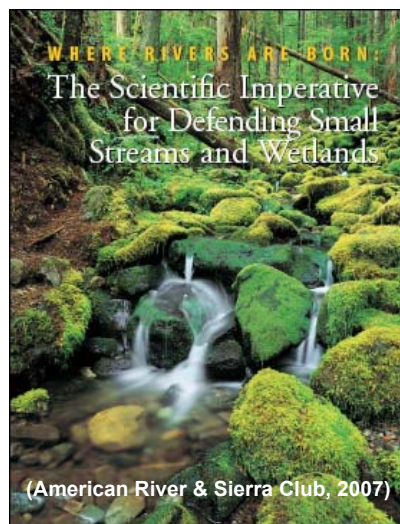
(SAGE Allier aval, 2007)

Des échanges multidirectionnels



Nombreux bénéfices fournis par les milieux aquatiques des têtes de bassin aux organismes localisés en aval

Relations entre ces milieux et les autres écosystèmes

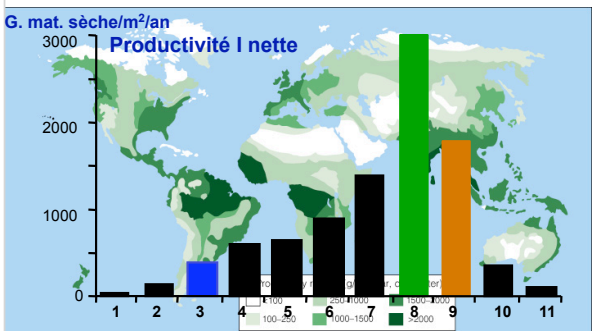
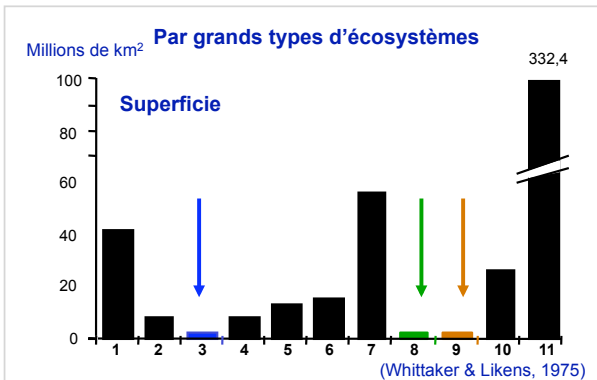


Des productivités records

→ Production végétale nette (production brute – respiration)

Marécages, estuaires :

moyenne 15 - 24 t matière sèche/ha/an
maximum 35 - 40 t/ha/an



→ Des productions moyennes variables (tonne matière sèche/ha/an)

* Bacon, 1997
** Le Demez et al., 1985
*** Tesson & Schricke, 1987

Tempéré

Meilleurs pâturages [Europe] : 10*

Schorre [Ouest-France] : 20-40**

Marais salés (Canche) : 24

Roselière [Basse-Loire] : 30-40**

Phytoplancton (dulçaquicole) : 15 - 30

Roselière : 13***

Forêt de plaine d'inondation : 4 - 18

Laîche : 3***

Tourbière arborée : 5 - 15

Tourbière à Sphaignes : 1 - 4



Tropical

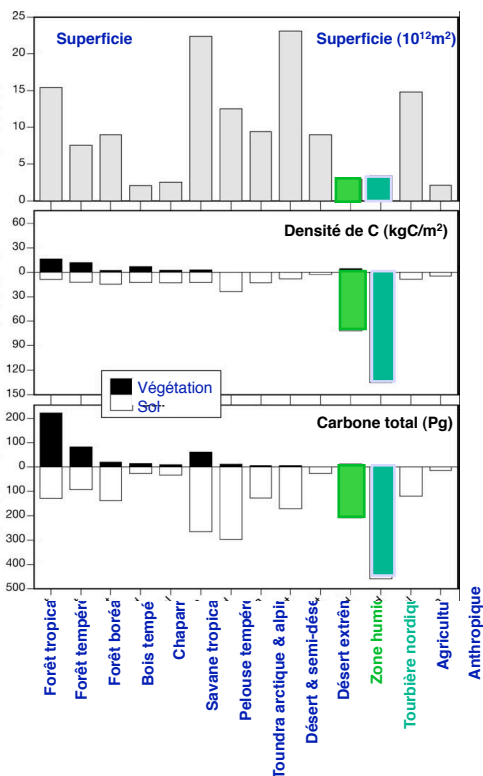
Papyrus [Kenya] : 30*

Roselière (tropicale) : 50 - 100

1. Déserts
 2. Toundras, alpages
 3. Lacs, cours d'eau
 4. Prairies tempérées
 5. Terres cultivées
 6. Savanes
 7. Forêts
 8. Marais, marécages
 9. Estuaires, algues
 10. Plateaux continentaux
 11. Océan
- (Shaw, 2000)

Autres rôles des zones humides

Superficie de ZH et tourbières, densité et stockage total de carbone par rapport aux autres écosystèmes et usages des terres



(Zedler & Kercher, 2005)

→ Réduction de l'énergie des eaux et des forces érosives

Rôle «protection des berges»

→ Production d'humus (tourbe)

Rôle «fertilisation», «source d'énergie», ...

Partition planétaire

→ Régulation

des grands cycles physico-chimiques, du climat

Rôle «tampon/changements globaux»

- Influence + sur la production d'oxygène,
- + sur le stockage du carbone,
- + sur le régime des précipitations,
- sur l'émission de méthane



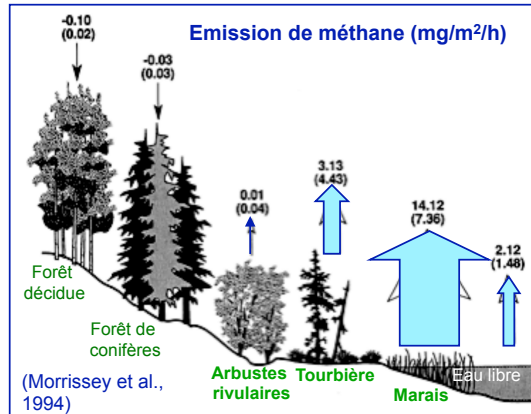
(MEDD, 2003)

Source de gaz à effet de serre, le méthane

Taux d'échange de CH₄ dans une végétation boréale le long d'un gradient topographique schématisé (valeur moyenne ± écart type)



(Saarnio, 2009)



Estimation des émissions de CH₄ (kg CH₄ / an/cellule de la grille) 7 catégories de systèmes aquatiques européens (tourbières, marais, lacs, rivière) Représentant moins de 3% de la superficie étudiée, dominance des lacs et tourbières

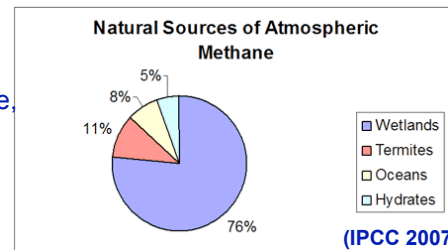
5,2 Tg/an de CH₄ total émis

48% tourbières minérotrophiques, 24% grands lacs, 12% tourbière ombrotrophiques

Mais des incertitudes : fortes variations dans une même catégorie, peu de résultats, problème de classification

A l'échelle mondiale

Des records de production de CH₄ par les zones humides



(IPCC 2007)

Performance différenciée selon les écosystèmes

→ En Angleterre,

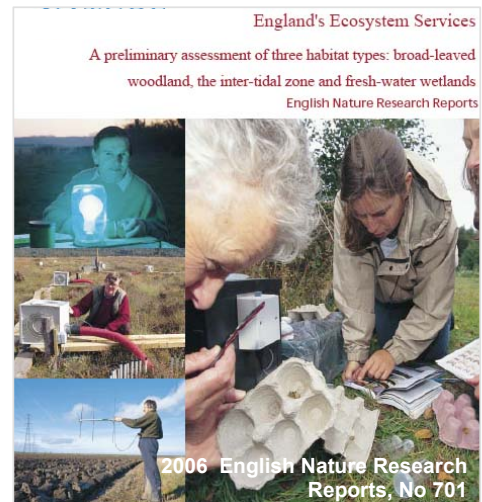
une étude comparative des services écosystémiques fournis par 3 types d'écosystèmes

Services et biens	ZH d'eau douce	ZH intertidale	Forêt de feuillus
Services d'appui			
Production d'oxygène	○	○	●
Cycle de nutriment	●	●	○
Prise d'eau et nutriments en profondeurs	○	○	○
Production primaire	○	○	○
Fourniture d'habitat/ espèces protégées	●	○	●
Services "production"			
Nourriture, boisson	○	●	○
Fibre et matériaux de construction	○	○	●
Produits médicinaux et cosmétique	○	○	○
Produits ornementaux et autres	○	○	○
Energie renouvelable	○	○	●
Services de régulation			
Filtration d'air pollué	○	○	●
Filtration d'eau	●	○	●
Détoxification de l'eau et de sédiments	●	○	●
Séquestration du C, régulation du climat	●	○	●
Régulation du climat local	○	○	○
Contrôle de l'érosion	●	○	○
Compensation des risques d'inondation	●	○	○
Maintien d'eau de surface	●	○	○
Réapprovisionnement des nappes	○	○	○
Services culturels			
Données paléo-environnementales	●	○	○
Préservation archéologique	●	○	○
Ressource éducative et scientifique	●	○	○
Banque de gène	○	○	○
Importance historique et culturelle	●	○	○
Loisirs et tourisme	●	○	○
Bien-être physique et personnel	○	○	○

- Forêt de feuillus
- Zone humide dulçaquicole
- Zone humide intertidale

Estimation qualitative

- Service pouvant être fourni.
- Service d'importance potentielle



Variabilité, résilience et seuils

→ Des caractéristiques des fonctions et services écosystémiques à considérer :

Variabilité

- au cours du temps, modulation de stocks ou flux dus aux facteurs aléatoires (interne, externe)

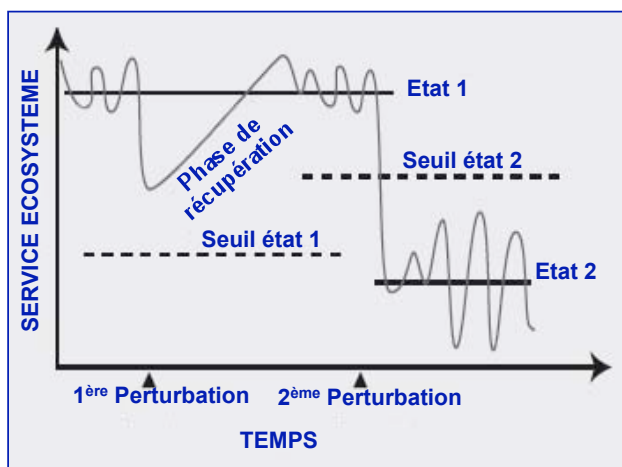
Résilience

- aptitude d'un système à retourner à son état original après une perturbation

Seuils

- déviation brutale, souvent soudaine (< 10 ans) du comportement moyen du système

Dynamique et stabilité des services écosystémiques



(Millennium Ecosystem Assessment, 2005)

→ Les zones humides soumises aux impacts conjugués des activités humaines terrestres et aquatiques

Effets immédiats ou décalés, dans le temps et l'espace

- directs = comblement
- indirects = pompage en amont
- en cascade, cumulés = pollution + extraction + barrage + ...

Des principes / fonctionnalités des ZH

→ Chaque ZH

Plusieurs fonctions et valeurs mais pas systématiquement toutes

Compatibilité, incompatibilité entre les fonctions

(Adamus et Stockwell, 1983)

	Recharge de nappes	Décharge eaux souterraines	Stabilisation des rivages	Dissipation des forces érosives	Contrôle des crues	Rétention des sédiments	Rétention, élimination nutriments	Support chaînes trophiques	Habitat : poissons	Habitat : faune sauvage	Récréation active	Valeur patrimoniale
Recharge de nappes					++	++	-	-	-	-	-	
Décharge eaux souterraines			-		--		±	++	±	++	++	++
Stabilisation des rivages	±	-		++	+	++	±	±	±	++	++	++
Dissipation des forces érosives					++	++	++	±	±	++	++	++
Contrôle des crues	++	±	+	++		++	++	±	±	++	±	
Rétention des sédiments	--	--	++	++	±		++	±	±	±	+	-
Rétention, élimination nutriments			++	++	++	++		±	±	±	±	
Support chaînes trophiques							-		±	±	±	
Habitat : poissons			-	-	-	-	±	+		±	++	++
Habitat : faune sauvage			-	-	-	-		+			+	++
Récréation active			--	--	--	--	--	--	--	--		
Valeur patrimoniale	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	-	

→ Expression changeante

(efficacité, ampleur)

des fonctions selon le type de ZH, son état

(intégrité, stade de développement, la saison)

→ «Pousser, optimiser» une fonction se fait au détriment d'autres

- En général, incompatible
- Parfois incompatible
- + Effets très variable
- ++ En général, amplification
- + Parfois amplification
- Case vide, pas d'interaction significative ou effet connu



(Fustec et al., 2000)



Les démarches d'évaluation des fonctions

Début des années 80, aux Etats-Unis, des méthodes standardisées d'évaluation

Wetland Evaluation Technique (WET) : 9 fonctions, 2 valeurs (Adamus, 1986)

1990 - Caractérisation hydrogéomorphologique des fonctions

- **Objectif** : évaluer les fonctions (restauration, compensation) (Brinson, 1993)
- **Une classification simple, combinaison de 3 attributs fortement interdépendants**
 - emplacement géomorphologique,
 - origine de l'eau,
 - hydrodynamique

• Pour chaque classe, des sites « référence » aux fonctions qualifiées et quantifiées (modélisation)

Approche hydrogéomorphologique

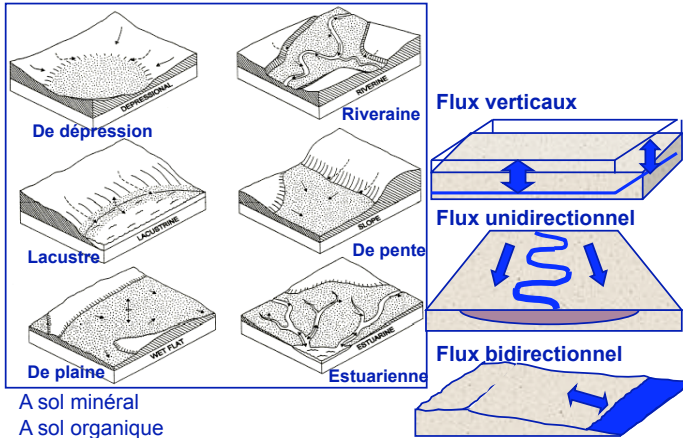
Méthode
Classification HGM
ZH Références
Indices de fonctionnalité
Protocole d'évaluation

Guides régionaux

Application
Caractérisation du site
Définition de la zone à évaluer
Collecte et analyse des données

Indices de fonctionnalités

Localisation des ZH = sources d'eau dominantes et hypodépressions différentes



A sol minéral
A sol organique

Catégories hydrodynamiques / types de flux dominants

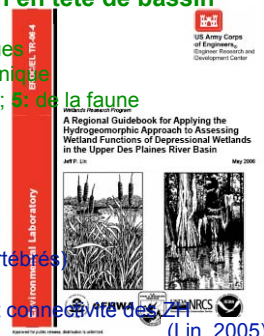
Fonctions des ZH et modèles d'évaluation

Maintien des caractéristiques pour les ZH de dépression en tête de bassin

- 1: du régime hydrologique ;
- 2: des processus biogéochimiques ;
- 3: de l'exportation carbone organique ;
- 4: des communautés végétales ;
- 5: de la faune

pour les potholes

- 1: du stockage eau de surface
- 2: des cycles des nutriments
- 3: de la rétention des particules
- 4: des communautés végétales
- 5: des réseaux trophiques (invertébrés)
- 6: des habitats de vertébrés
- 7: Maintien de la mosaïque et et connectivité des ZH



(Lin, 2005)

Version européenne de la méthode

→ En Europe, années 80-90

Des programmes sur l'évaluation des fonctions et valeurs des ZH

→ Wetland Evaluation Decision Support System (WEDSS) (Maltby et al., 1994)

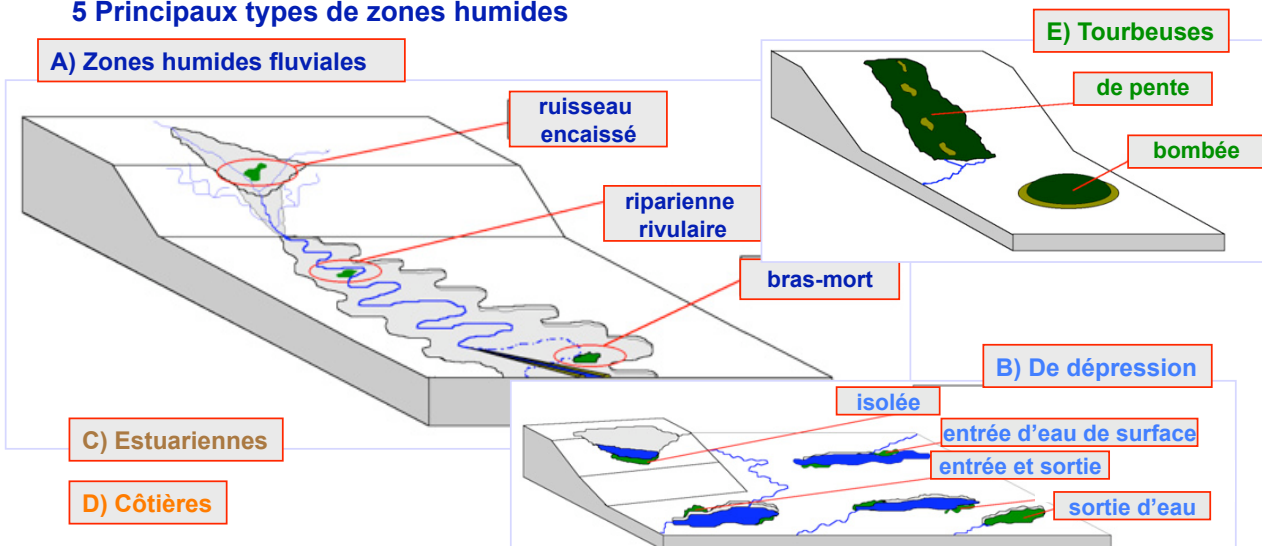
Système expert à destination des gestionnaires et décideurs

Objectif : valorisation des ZH

Combinaison 1 SIG + 1 base de données (indicateurs variables de contrôle)

+ des modèles de simulation sur le fonctionnement et les fonctionnalités

5 Principaux types de zones humides



Zones humides de bas-fonds, des résultats opérationnels

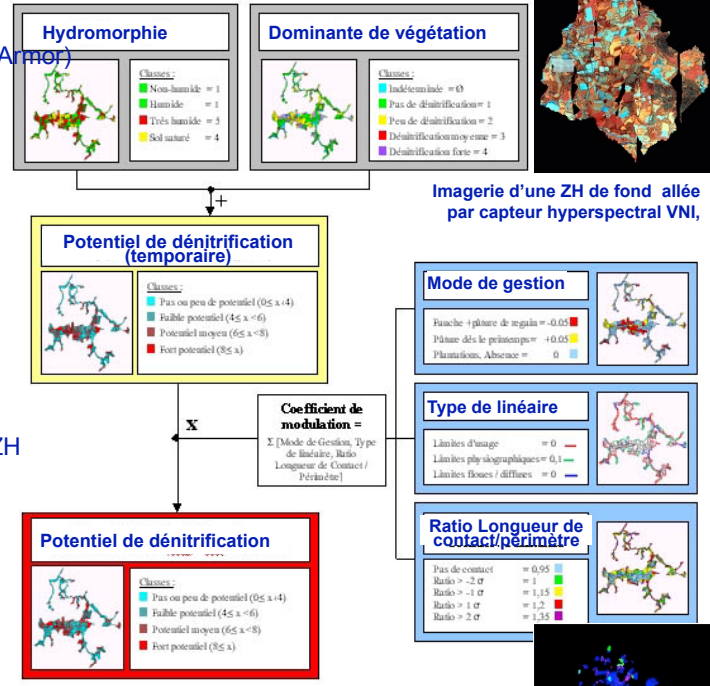
→ Application au sous bassin versant du Rozanbo (10 km²)

Tête de bassin versant du Yar (Côtes d'Armor)

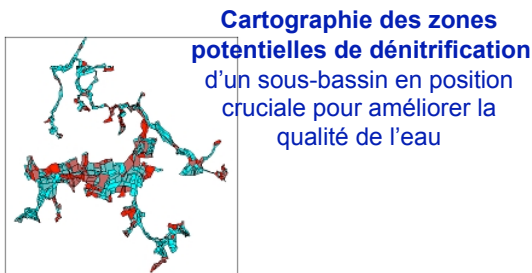
Nombreuses ZH de fond de vallées
Bocage dense, occupation des sols variée

Caractérisation, localisation:

- de l'hydromorphie de surface
Facteur 1^{er} de la dénitrification
- des associations végétales caractéristiques
Sources de carbone, bio-indicateurs
- du mode de gestion des parcelles
Détermination du flux de carbone dans la ZH (exportation, recyclage)



Imagerie d'une ZH de fond allée par capteur hyperspectral VNI,



Cartographie : photo-interprétation, SIG (images hyperspectrales, 2 m résolution)

Cartographie du mode d'utilisation des prairies par capteur hyperspectral VNIR

- Prairie artificielle fauchée
- Prairie artificielle pâturée
- Prairie naturelle fauchée
- Prairie naturelle pâturée

L'approche du bassin Seine-Normandie

Identifier les zones alluviales les plus efficaces à l'échelle du bassin Seine-Normandie

→ Elaboration d'une «Typologie fonctionnelle des zones humides riveraines»

Croisement des bases de données et des unités de travail (ArcView) :

nappe, végétation, gravières/plans d'eau, obstacles, chenaux, barrages

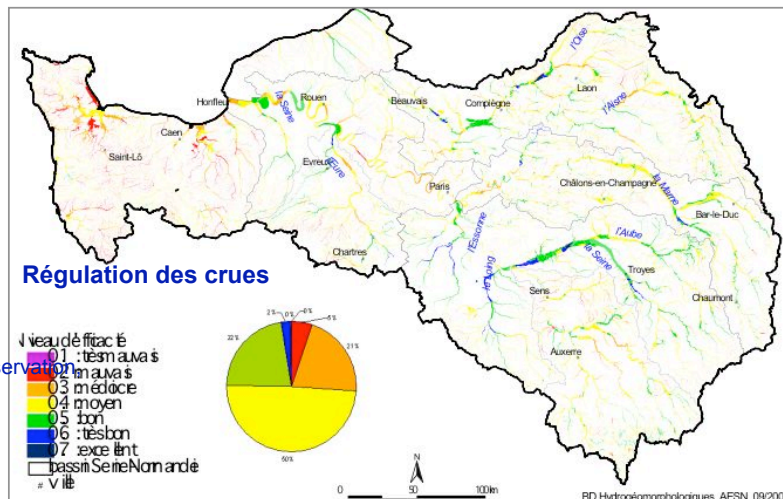
- Construction d'indices fonctionnels
quantification de la potentialité des ZH / fonctions (régulation des crues, rétention des nitrates)

Degré de fonctionnement des ZH riveraines dans le bassin Seine-Normandie

(BD Hydrogéomorphologiques Piren-Seine, AESN, 09/2005)

- 1 code/indicateur/corridor fluvial
- 2 indices fonctionnels «crue», «nitrate»
- 7 classes d'efficacité

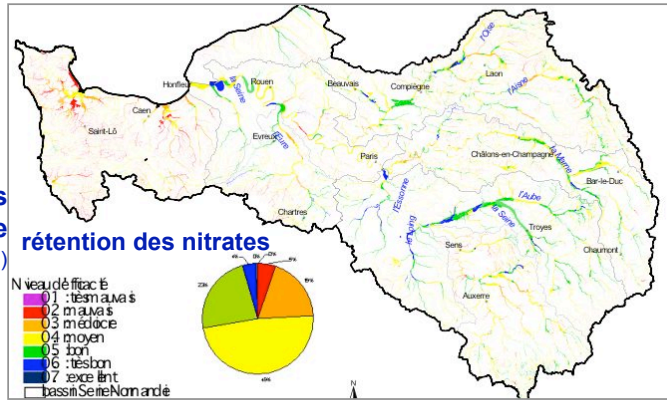
Classe	Niveau d'efficacité	Couleur	Types d'action
0.1	très mauvais	rouge	Renaturation
0.2	mauvais	orange	
0.3	médiocre	jaune	Restauration, réglementation
0.4	moyen	vert clair	
0.5	bon	vert foncé	Protection, préservation, réglementation
0.6	très bon	bleu clair	
0.7	excellent	bleu foncé	



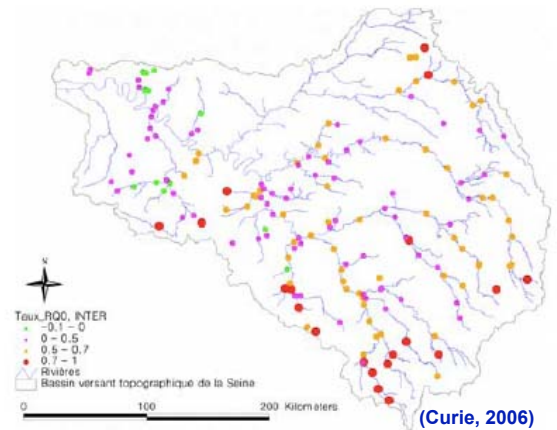
L'enjeu qualité de l'eau dans le bassin Seine-Normandie

→ Indices fonctionnels
quantification de la potentialité des ZH /
fonction de rétention des nitrates

Degré de fonctionnement des ZH riveraines
dans le bassin Seine-Normandie
(BD Hydrogéomorphologiques Piren-Seine, AESN, 09/2005)



Carte de la répartition des taux de rétention
sur le bassin topographique de la Seine
(RQ0, INTER)
Taux les plus élevés majoritairement
en tête de bassins versants

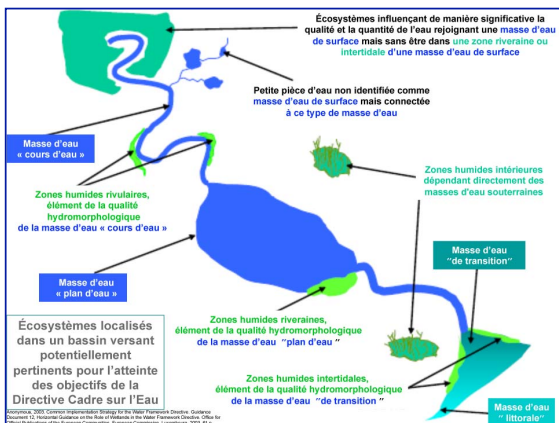


→ Définition des sites prioritaires,
intégration dans les programmes de mesures
(DCE, LEMA, ...)

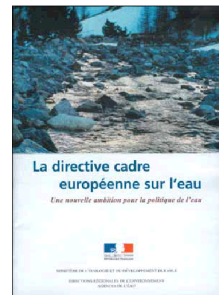
→ Démarche opérationnelle

Place des zones humides dans la DCE

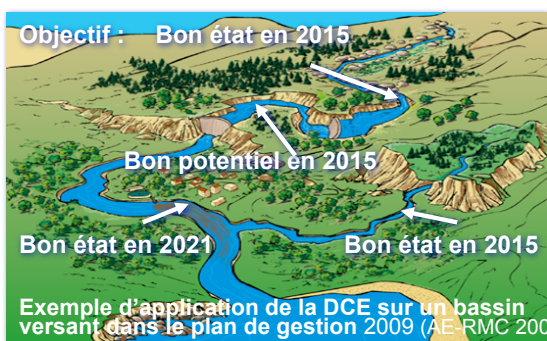
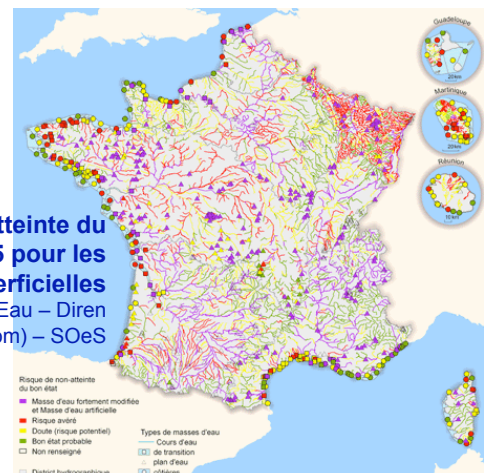
→ 2000 Directive cadre sur l'eau
Les zones humides ne font pas partie des masses d'eau



→ Toutefois, prise en compte
parmi les masses d'eau et
écosystèmes pertinents pour
atteindre la bon état
Intégrées au Registre des
zones protégées de la DCE



Horizontal Guidance Document on the Role of Wetlands
in the Water Framework Directive 17/12/2003



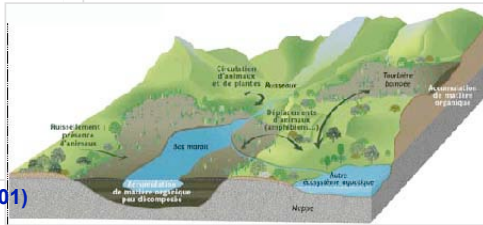
D'autres démarches

→ En France, des démarches variées



(AE-RMC, 2001)

Marais et tourbières Flux de matière organique



→ Au cours des années 90

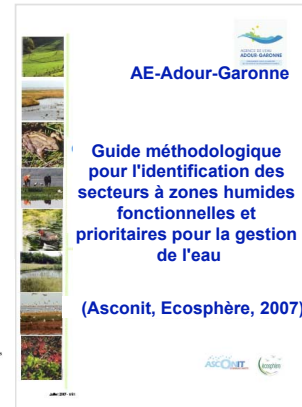
- projets de recherche du PNRZH
- travaux à la demande des Agences de l'eau

→ Les indicateurs de fonction du bassin Rhône-Méditerranée-Corse

→ L'identification de zones humides fonctionnelles du bassin Adour-Garonne

Une démarche en 3 étapes

- 1 : Découper le territoire en secteurs à ZH et secteurs à enjeux
- 2 : Définir les critères, évaluer des fonctions par secteurs
- 3 : Analyser les résultats, proposer des secteurs à ZH prioritaires



AE-Adour-Garonne

Guide méthodologique
pour l'identification des
secteurs à zones humides
fonctionnelles et
prioritaires pour la gestion
de l'eau

(Asconit, Ecosphère, 2007)

En résumé

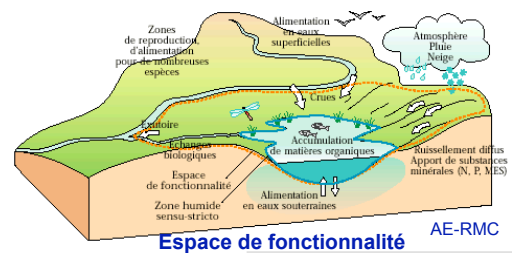
→ Rôle capital des ZH

Des **infrastructures naturelles** aux multiples fonctions et valeurs d'efficacité variable

Des principes pour l'action, **raisonner /fonctionnement et fonctionnalités**
à l'échelle locale et surtout du bassin versant

→ Les zones humides de tête de bassin

Petites, liées au chevelu, jamais vraiment isolées,
des connexions hydrologiques cachées
Souvent oubliées dans les inventaires et
jugées peu importantes

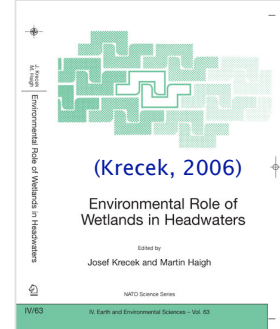


Espace de fonctionnalité AE-RMC



→ Pourtant des services essentiels

- Atténuation des inondations
- Soutien débit d'été, recharge de nappe
- Piégeage des sédiments
- Amélioration de la qualité de l'eau
- Fourniture d'énergie en aval (carbone assimilable)
- Des flores et faunes riches et rares
- Une biodiversité due au caractère oligotrophe et parfois éphémère de ces milieux



(Krecek, 2006)

Environmental Role of
Wetlands in Headwaters

Edited by
Josef Krecek and Martin Haigh

NATO Science Series

IV/63 In Earth and Environmental Sciences - Vol. 63

**Responsables de l'intégrité des systèmes aquatiques
(physique, chimique et biologique)**

**→ Démonstration des services
Moyen de faire bouger les décideurs**